

Application Pathways of Microalgae Biofuel

Yuan Zhuang

Nanjing University Environmental Planning & Design Research Institute (JiangSu) Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210093, China

Abstract

Addressing climate change is a common challenge for the world, which urgently need the accelerating of green and low-carbon energy. This is also a global opportunity. Microalgae are rich in fatty acids and carbohydrates, which can absorb a large amount of carbon dioxide during their life cycle and convert it into biomass energy. This conversion not only helps to reduce greenhouse gas emissions, but also provides renewable energy, which is one of the important ways to achieve carbon neutrality. This paper provides a comprehensive review of the latest advancements in the application pathways of microalgae and the quality of biofuels, and proposed key directions for the future development of the microalgae biofuel industry.

Keywords

biofuel; algae; lipid

微藻生物燃料的应用途径

庄园

南大环境规划设计研究院（江苏）有限公司，中国·江苏·南京 210093

摘要

应对气候变化，是全球面对的共同挑战，加快能源绿色低碳发展是全球共同机遇。微藻含有丰富的脂肪酸和碳水化合物，能够在其生命周期内吸收大量的二氧化碳，并将其转化为生物质能源，这种转化不仅有助于减少温室气体排放，还能提供可再生能源，是实现碳中和的重要途径之一。本文对微藻的应用途径、生物燃料的品质等最新进展进行了全面的综述，并提出微藻生物燃料产业未来发展的关键方向。

关键词

生物质燃料；微藻；脂质

1 引言

应对气候变化，是全球面对的共同挑战，加快能源绿色低碳发展是全球共同机遇，生物燃料一直被认为最有潜力替代化石燃料，其中发展微藻生物燃料是解决能源危机和环境问题的有效途径^[1]，除了生物燃料，微藻还可以提供丰富的蛋白质、碳水化合物、酶、碘、色素、多种维生素和矿物质。本文总结概括了微藻生物燃料的应用途径，为微藻生物能源的发展提供参考依据。

2 微藻作为生物燃料的应用途径

微藻具有产量高和适应性强的优点，可以最大限度地减少或消除第一代和第二代生物燃料对环境和粮食供应的负面影响。目前，全球变暖和气候变化带来的严重危机再次激发了人们对微藻生物燃料替代化石燃料成为主要能源之一的兴趣^[2]。微藻作为生物燃料的应用途径主要包括生物乙

醇、生物柴油、生物氢和沼气等。

2.1 微藻作为生物乙醇原料

生物乙醇受到青睐的主要原因在于它对环境的影响比化石燃料小很多，这是由于生物乙醇含有较少的硫，因而在燃烧时有害温室气体的排放将大大减少。虽然生物乙醇的能量密度比汽油少30%左右（~66%）^[3]，但其原料来源丰富，生物乙醇的适用范围更大。生物乙醇目前主要由甘蔗、木薯和玉米等农业原料通过水解和发酵生产。但是微藻淀粉可以在一定程度上取代农业原料作为水解和发酵的原材料，比如由小球藻属积累的淀粉与谷物中的淀粉在结构上就十分相似^[4]。另一方面，微藻生物量包含藻细胞壁中的纤维素，但不含木质素，因而微藻的纤维素比高等植物的纤维素更容易被水解成葡萄糖。淀粉含量较高的柔毛藻、紫球藻、绿球藻、草履虫和栅藻都是生产乙醇的良好原料^[5]。

2.2 藻类生物柴油原料

生物柴油可以由任何脂质含量高的原料通过三酰基甘油酯交换反应生产，例如植物原料棕榈仁、大豆、菜籽油、向日葵、油菜等。然而，使用植物原料存在粮食、土地资源浪费和成本过高等问题，因此具有更高的光合效率且不占用

【作者简介】庄园（1990-），女，中国江苏人，硕士，工程师，从事环境咨询研究。

耕地资源的微藻在生产生物柴油方面更具优势。生产生物柴油应选择脂质含量高的藻种,例如目前常用的莱茵衣藻、杜氏盐藻、小球藻属、布劳恩葡萄球菌、三角藻和假南海水藻等,这些藻类的脂质含量可高达其总质量的60%^[6]。藻体内的脂质主要是甘油三酯或脂肪酸,通常以膜组分、储存产物或代谢物的形式存在。通过控制氮饥饿、营养物质供应等生长特性来优化培育条件,可以促进藻类中脂肪酸的积累,提高生物柴油产量。

2.3 藻类作为生物氢原料

生物氢(BioH₂)这种具有可再生性、无污染和高效率等特点的生物燃料极具应用潜力,近年来,利用藻类生物质生产氢气的新技术开始受到研究者和产业界的关注。

在藻类生物质中,生物氢的产生主要通过两种不同的机制:发酵和光合作用。在发酵过程中,生物氢可以通过光发酵和暗发酵的方式产生。光发酵是指在光照条件下,微生物将有机物转化为氢气和二氧化碳的过程,这一过程通常作为三羧酸循环(TCA循环)的一部分发生,其中氮是限制因素;而暗发酵则是在无光条件下,复杂的有机化合物被微生物分解成更简单的单体,然后转化为低分子量的有机酸和酒精,在这个过程中会产生氢气,但其产量相对较低。不过,这个过程还会生成丁酸、乙酸等具有附加价值的副产物。而生物氢的光合合成生产则通过直接生物光解和间接生物光解分解水分子产生氢气。直接光解是在氢化酶的催化作用下,利用光能将水分子分解成氢气和氧气的过程。而间接光解则是一个更为复杂的过程,其底物来源于淀粉、葡萄糖或其他类似化合物等储备碳源。

目前已报道至少14种蓝藻属微生物可以在较宽泛的培养条件下生产氢气^[7],例如鱼腥藻属(*Anabaena sp.*)的每毫克叶绿素a氢产量可达68 μmol。通过筛选高产率的微藻品种,可以实现生物氢的高效生产。此外,通过调整pH值(通常在5.2~6.0之间)、底物浓度、原料性质以及生物反应器类型等培养条件也可以进一步提高氢气的产率,在一定程度上解决氢产量低的问题。

2.4 藻类作为沼气原料

作为一种高能量密度的气体,沼气可用于发电、供热或作为氢气生产的原料。研究表明^[8],富含脂质的藻类生物质在沼气的厌氧消化生产中具有较大的潜力,其理论沼气产量可达到每公斤生物质约287~611L。然而,实际产量受到藻种类别和操作温度的显著影响。例如,莱茵衣藻(*C. reinhardtii*)在28℃~31℃下产生约580L/kg,而小球藻(*Scenedesmus*)在45℃下产生约611L/kg。此外,高温消化(50℃~60℃)相比中温消化(20℃~40℃)能多产生大约6~10倍的沼气。

厌氧消化过程可以分为以下几个阶段。水解阶段:在这一阶段,复杂的长链脂质或碳水化合物在催化剂的作用下与水反应,分解成相应的单体。发酵细菌、原生动物或真菌

产生的纤维素酶、蛋白酶等外泌酶会促进分解反应,同时产生氢气。产酸阶段:可溶性单体在这一阶段通过与氢的反应转化为丙酸、丁酸、乳酸等酸类物质,随后被产酸细菌吸收,形成乙酸、二氧化碳和氢气。产甲烷阶段:这是厌氧消化的最后阶段,培养基中产生的醇和酸在产甲烷菌等微生物的作用下转化为甲烷。

3 微藻脂质组成及其燃料性能

脂肪酸组成是评估微藻作为生物燃料原料潜力的关键因素,其分子的结构、碳链长度以及双键的数量和位置决定了其作为生物燃料的燃烧特性、低温流动性和氧化稳定性。微藻脂肪酸组成受菌株性质、生命周期、培养基成分、pH值、温度、光暗比和CO₂供应等因素的影响。比如当微藻暴露环境处于营养饥饿状态,特别是氮或磷不足时,则会上调合成中性脂的代谢途径,以储存更多的能量,提高细胞内三酰甘油的含量。然而,这种生理调整可能会以牺牲生长速率为代价,导致藻细胞整体脂质产量的下降。而在微藻的生长指数期添加碳酸氢钠能够刺激脂质的积累,在生长静止期调高pH值的同时限制氮补给则能够进一步促进脂肪酸的合成。例如,小球藻在氮胁迫条件下,脂质含量从细胞干重的20%显著提升至53%,而月牙藻在氮饥饿条件下,脂质含量也从16%增加至49%^[9]。磷是微藻生长的关键营养元素之一,在核酸合成和能量代谢中扮演着重要角色。在磷胁迫条件下,微藻倾向于增加脂质的合成和积累。例如,席藻(*Phormidium sp.*)在磷酸盐浓度降低时,其总脂质含量细胞干重的17%显著增加到27%^[10]。

微藻生产的脂肪酸具有不同的碳链长度(12~22)和饱和度,对生物燃料的性能有重要影响。饱和度更高的脂肪酸是生产生物柴油的理想原料。在绿藻中,棕榈酸(C16:0)和油酸(C18:1)是脂肪酸组成的主要成分,而硬脂酸(C18:0)的含量较低(<3.3%)。冷滤点(CFPP)指示脂肪酸甲酯在低温下结晶并堵塞燃油系统的可能性,是评估生物燃料在低温下性能的关键指标。油酸对于平衡生物燃料的燃烧特性和CFPP具有重要作用。研究表明,小球藻和斜生栅藻等具有较高的饱和长链脂肪酸甲酯浓度和良好的CFPP值,因此这些藻种是作为生产生物柴油的理想原料。而油脂的氧化稳定性(OS)衡量了油脂对氧化降解的敏感性,也与脂肪酸饱和度密切相关。亚油酸(C18:2)和α-亚麻酸(C18:3)等多不饱和脂肪酸(PUFAs)含有更多双键,比单不饱和脂肪酸(MUFA)更容易发生氧化。在微藻中,绿藻的饱和脂肪酸(SFA)和单不饱和脂肪酸比多不饱和脂肪酸(PUFAs)含量更高,其产生的C16:1、C18:1和C14:0脂肪酸摩尔比大约为5:4:1,能够生产具有良好燃料性能指数(CFPP)和高燃烧热值的生物柴油。然而,CO₂的提高对微藻脂肪酸的饱和度有较大影响。例如,在2.5%的CO₂浓度下,布朗葡萄藻能够产生更多得多不饱和脂肪酸(PUFAs),

而小球藻在 5% 和 10% 的 CO₂ 浓度下则产出了更高比例的饱和脂肪酸 (SFA) 和单不饱和脂肪酸 (MUFA) 含量。生物燃料行业很大程度上依赖其生产油品的质量, 生物柴油的高品质不仅仅是由单个脂肪酸决定的, 而是需要在产品中总脂肪酸组成中各脂肪酸成分的量与质之间达到平衡。为了确保生物柴油的性能和可靠性, 一些国家已经开始实施基于物理和化学参数的质量标准和指导方针。

4 展望与结论

微藻生物量含有丰富的脂肪酸和碳水化合物, 使其成为生产生物柴油、乙醇、丁醇和生物甲烷等多种可再生生物燃料的理想原料。近年来, 微藻的遗传和代谢工程研究取得了显著进展, 有望实现生产成本优化, 从而推动产业化发展。利用转基因菌株、高效的收获和油脂提取技术, 结合高附加值产品的生产和副产品的综合利用, 微藻产业有望实现工业化规模的生产。预计到 2028 年, 微型藻类产品的市场价值有望达到 18 亿美元左右, 显示了微藻产业的增长潜力和市场对可持续能源解决方案的需求。然而, 生产成本仍然是微藻生物燃料产业发展的主要挑战, 开发更经济、高效的油脂提取和纯化工艺是未来的关键方向。微藻生物燃料产业的未来努力将集中在优化培养条件、改进收获技术、提高提取效率和副产品利用等方面, 以降低成本、提高效率, 并最终实现微藻生物燃料的商业化生产。

参考文献

- [1] 刘雪艳, 苏忠亮, LIU, 等. 微藻生物燃料的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2017, 34(3): 4.
- [2] SPOLAORE P, JOANNIS-CASSAN C, DURAN E, et al. Commercial applications of microalgae [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, 101(2): 87-96.
- [3] RAHEEM A, PRINSEN P, VUPPALADADIYAM A K, et al. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 181: 42-59.
- [4] MOODY J W, MCGINTY C M, QUINN J C. Global evaluation of biofuel potential from microalgae [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2014, 111(23): 8691-8696.
- [5] DEMIRBAS A, DEMIRBAS M F. Importance of algae oil as a source of biodiesel [J]. *Energy Convers Manage*, 2011, 52(1): 163-170.
- [6] SCOTT S A, DAVEY M P, DENNIS J S, et al. Biodiesel from algae: challenges and prospects [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(3): 277-286.
- [7] BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 557-577.
- [8] OSLAJ M, MURSEC B. BIOGAS AS A RENEWABLE ENERGY SOURCE [J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2010, 17(1): 109-114.
- [9] LI X, HU H-Y, GAN K, et al. Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5494-5500.
- [10] MALLICK N, BAGCHI S K, KOLEY S, et al. Progress and Challenges in Microalgal Biodiesel Production [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7.